

УДК 629.7.02н  
ББК 39.52  
Л91

**Л91** **Шаошань Лю, Лиюнь Ли, Цзе Тан, Шуаш Ву, Жан-Люк Годье**  
Разработка беспилотных транспортных средств / науч. ред. В. С. Яценков;  
пер. с англ. П. М. Бомбаковой. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 246 с.: ил.

**ISBN 978-5-97060-969-9**

В книге представлен один из первых технических обзоров беспилотных транспортных средств (БТС), адресованных широкой аудитории компьютерных специалистов и инженеров, а также студентов технических вузов и всех, кто сталкивается с БТС на практике.

Авторы делятся практическим опытом разработки БТС – начиная с алгоритмов локализации, восприятия, планирования и контроля и заканчивая глубоким обучением моделей. Рассматриваются последние достижения в области управления БТС, а также практические примеры из реальной жизни, что позволит читателям эффективно применять полученные знания в коммерческих проектах.

В разделе «Преподавание и обучение» множество полезной информации, которая поможет использовать книгу как часть программы учебных курсов.

УДК 629.7.02  
ББК 39.52

© 2020 Morgan and Claypool Publishers All Rights Reserved Morgan and Claypool Publishers

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN (англ.) 978-1-68173-935-9  
ISBN (рус.) 978-5-97060-969-9

© 2020 by Morgan & Claypool  
© Оформление, издание, перевод, ДМК Пресс, 2022

# Оглавление

<b>Об авторах .....</b>	<b>10</b>
<b>Вступительное слово от издательства.....</b>	<b>13</b>
<b>Предисловие к русскому изданию .....</b>	<b>14</b>
<b>Предисловие ко второму изданию .....</b>	<b>16</b>
<b>Глава 1. Знакомство с беспилотными технологиями .....</b>	<b>19</b>
1.1. Обзор технологий в составе БТС .....	19
1.2. Алгоритмы БТС .....	20
1.2.1. Сбор данных об окружающей среде (сенсорное сканирование) .....	20
1.2.2. Восприятие .....	21
1.2.3. Распознавание и отслеживание объектов .....	24
1.2.4. Действия .....	24
1.3. Клиентская система БТС.....	26
1.3.1. Операционная система для роботов (ROS) .....	26
1.3.2. Аппаратная платформа .....	28
1.4. Облачная платформа БТС.....	29
1.4.1. Симуляция.....	29
1.4.2. Создание HD-карт .....	30
1.5. Это только начало .....	31
<b>Глава 2. Локализация БТС .....</b>	<b>32</b>
2.1. Локализация с помощью спутниковых навигационных систем .....	32
2.1.1. GNSS .....	32
2.1.1. Анализ погрешностей GNSS .....	33
2.1.3. Спутниковые системы дифференциальной коррекции .....	35
2.1.4. Кинематический и дифференциальный режимы GPS .....	35
2.1.5. Позиционирование высокой точности.....	37
2.1.6. Интеграция GNSS и INS .....	39
2.2. Локализация с помощью лидара и HD-карт .....	40
2.2.1. Технология LiDAR.....	40
2.2.2. HD-карты. Краткий обзор.....	43
2.2.3. Локализация посредством лидара и HD-карт.....	47
2.3. Визуальная одометрия .....	51
2.3.1. Стереовизуальная одометрия .....	52
2.3.2. Монокулярная визуальная одометрия .....	53
2.3.3. Инерциальная визуальная одометрия .....	54

2.4. Счисление координат и колесная одометрия .....	55
2.4.1. Колесные энкодеры.....	56
2.4.2. Погрешности колесной одометрии .....	57
2.4.3. Минимизация погрешностей колесной одометрии.....	58
2.5. Сбор и обобщение данных нескольких сенсоров .....	60
2.5.1. Беспилотный автомобиль Boss для городских условий от Университета Карнеги–Меллона (CMU) .....	60
2.5.2. Беспилотный автомобиль Junior для городских условий от Стэнфордского университета .....	62
2.5.3. Bertha от Mercedes Benz .....	64
2.6. Справочные материалы.....	66

### **Глава 3. Алгоритмы восприятия беспилотных технологий .....**

3.1. Введение .....	69
3.2. Датасеты .....	70
3.3. Обнаружение .....	72
3.4. Сегментация .....	74
3.5. Стереозрение, оптический поток, поток сцен .....	76
3.5.1. Стереоскопия и глубина .....	76
3.5.2. Оптический поток.....	77
3.5.3. Поток сцен .....	78
3.6. Отслеживание.....	79
3.7. Заключение.....	82
3.8. Справочные материалы.....	82

### **Глава 4. Глубокое обучение в алгоритмах восприятия**

#### **беспилотных технологий .....**

4.1. Сверточные нейронные сети .....	85
4.2. Обнаружение .....	86
4.3. Семантическая сегментация.....	90
4.4. Стереозрение и оптический поток .....	93
4.4.1. Стереозрение.....	93
4.4.2. Оптический поток.....	95
4.4.3. Обучение без учителя для плотного сопоставления изображений ....	97
4.5. Заключение .....	99
4.6. Справочные материалы.....	100

### **Глава 5. Прогнозирование и маршрутизация .....**

5.1. Планирование и управление. Общие сведения .....	102
5.1.1. Архитектура: планирование и управление в широком смысле ....	102
5.1.2. Область ответственности каждого модуля: какие задачи решают модули .....	104
5.2. Прогнозирование движения .....	107
5.2.1. Поведенческое прогнозирование с точки зрения классификации объектов .....	109
5.2.2. Генерация траектории транспортного средства.....	113

5.3. Маршрутизация на основе полос движения .....	116
5.3.1. Применение взвешенного ориентированного графа для задач маршрутизации .....	117
5.3.2. Распространенные алгоритмы маршрутизации .....	120
5.3.3. Стоимость графа маршрутизации: слабая или сильная маршрутизация .....	123
5.4. Заключение .....	124
5.5. Справочные материалы.....	124

## **Глава 6. Принятие решений, планирование и управление ..... 126**

6.1. Принятие поведенческих решений .....	126
6.1.1. Подход с применением марковского процесса принятия решений .....	128
6.1.2. Подход «разделяй и властвуй» на основе сценариев .....	131
6.2. Планирование движения.....	139
6.2.1. Модель транспортного средства, модель дороги и система координат SL.....	142
6.2.2. Планирование движения на основе планирования пути и скорости .....	143
6.2.3. Планирование движения посредством продольного и поперечного планирования.....	150
6.3. Управление на основе обратной связи .....	154
6.3.1. Модель «Велосипед» .....	155
6.3.2. ПИД-регулирование.....	157
6.4. Заключение .....	158
6.5. Справочные материалы.....	159

## **Глава 7. Планирование и управление на основе обучения с подкреплением..... 161**

7.1. Введение .....	161
7.2. Обучение с подкреплением .....	163
7.2.1. Q-обучение .....	166
7.2.2. Методы «субъект–критик».....	170
7.3. Планирование и управление БА на основе алгоритмов с обучением.....	172
7.3.1. Применение обучения с подкреплением на уровне принятия поведенческих решений.....	173
7.3.2. Применение обучения с подкреплением на уровнях планирования и управления .....	173
7.4. Заключение .....	177
7.5. Справочные материалы .....	177

## **Глава 8. Клиентские системы для беспилотных технологий ..... 179**

8.1. Сложность системы беспилотного управления .....	179
8.2. Операционная система для беспилотной технологии .....	181
8.2.1. Обзор ROS .....	181

8.2.2. Надежность системы.....	183
8.2.3. Повышение производительности.....	185
8.2.4. Управление ресурсами и безопасность .....	185
8.3. Вычислительная платформа .....	186
8.3.1. Реализация вычислительной платформы.....	186
8.3.2. Существующие вычислительные решения .....	186
8.3.3. Вопросы архитектуры вычислительной системы .....	188
8.4. Справочные материалы.....	191

## **Глава 9. Облачные платформы для беспилотных технологий.....192**

9.1. Введение .....	192
9.2. Инфраструктура .....	193
9.2.1. Структура распределенных вычислений .....	194
9.2.2. Распределенное хранение .....	194
9.2.3. Гетерогенные вычисления .....	195
9.3. Симуляция .....	197
9.3.1. BinPipeRDD .....	198
9.3.2. Объединение Spark и ROS.....	199
9.3.3. Производительность.....	199
9.4. Обучение модели .....	200
9.4.1. Почему именно Spark?.....	200
9.4.2. Архитектура обучающей платформы .....	201
9.4.3. Гетерогенные вычисления .....	202
9.5. Создание HD-карт.....	203
9.5.1. HD-карты .....	204
9.5.2. Создание карт в облаке.....	205
9.6. Заключение .....	206
9.7. Справочные материалы.....	207

## **Глава 10. Беспилотная доставка «до двери»**

### **в сложных дорожных условиях.....208**

10.1. Предыстория и предпосылки .....	208
10.2. Технологии беспилотной доставки в сложных дорожных условиях ...	209
10.3. JD.com: решение с использованием беспилотных технологий .....	211
10.3.1. Архитектура беспилотных технологий.....	211
10.3.2. Локализация и HD-карты .....	212
10.3.3. Восприятие .....	214
10.3.4. Прогнозирование, принятие решений и планирование движения.....	216
10.4. Стратегии защиты и обеспечения безопасности.....	219
10.4.1. Проверка в симуляции.....	219
10.4.2. Мониторинг на стороне транспортного средства .....	220
10.4.3. Удаленный мониторинг.....	220
10.5. Развертывание в производственной среде .....	220
10.6. Полученные уроки .....	221
10.7. Справочные материалы.....	222

## **Глава 11. Беспилотные транспортные средства от PerceptIn .... 223**

11.1. Введение .....	223
11.2. Дорогостоящие технологии .....	224
11.2.1. Сенсорное сканирование .....	224
11.2.2. Локализация .....	225
11.2.3. Восприятие .....	225
11.2.4. Принятие решений .....	226
11.2.5. Создание и обслуживание HD-карт .....	226
11.2.6. Интеграция системы .....	227
11.3. Достижение ценовой доступности и надежности .....	227
11.3.1. Сбор и обобщение данных нескольких сенсоров .....	228
11.3.2. Модульная конструкция .....	229
11.3.3. Высокоточные визуальные карты .....	230
11.4. Развертывание сети беспилотных низкоскоростных электромобилей (LSEV) для предоставления услуг .....	231
11.5. Выводы .....	232
11.6. Справочные материалы .....	232

## **Применение этой книги в преподавании и обучении ..... 234**

1. Введение .....	234
2. Существующие учебные курсы по управлению БТС .....	235
3. Модульный и интегрированный подход к обучению .....	236
3.1. Методика преподавания .....	236
3.2. Учебные материалы к модулям .....	237
3.3. Интеграционные экспериментальные платформы .....	238
4. Пилотные тематические курсы .....	238
4.1. Введение в курс БТС .....	239
4.2. Изучение БТС как дополнение курса о встроенных системах .....	240
4.3. Курс профессиональной подготовки .....	240
5. Заключение .....	241
Справочные материалы .....	242

## **Предметный указатель ..... 244**